Número 97
Octubre 1984

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

6 **EFECTOS CLIMATICOS DE UNA GUERRA NUCLEAR, Richard P. Turco, Owen B. Toon, Thomas P. Ackerman, J. B. Pollack y Carl Sagan** ¿Qué sería un "invierno nuclear"?

20 **BANDEO DE CROMOSOMAS, Felipe Cortés**
Técnicas para establecer el origen de las anomalías congénitas y las relaciones taxonómicas.

30 **OBJETO SUPERLUMINOSO EN LA GRAN NUBE DE MAGALLANES, John S. Mathis, Blair D. Savage y Joseph P. Cassinelli** Quizá se trate de una estrella de enorme masa.

48 **PROTEINAS DE ONCOGENES, Tony Hunter**
Inducen cáncer al imitar parcialmente la función de las determinadas por genes normales.

62 **EL TEMPLO MAYOR DE TENOCHTITLAN, Eduardo Matos Moctezuma**
Descubierto por azar, se ha emprendido su excavación exhaustiva en el corazón de México.

74 **FIBRAS OPTICAS EN VEGETALES, Dina F. Mandoli y Winslow R. Briggs**
Las plantas podrían aprovecharse de "viaductos lumínicos" para coordinar su fisiología.

84 **MANIPULACION MECANICA DE PARTES ALEATORIAMENTE ORIENTADAS, Berthold K. P. Horn y Katsushi Ikeuchi** ¿Cómo se las ingenia el robot para escoger la pieza idónea?

96 **REPRODUCCION COOPERATIVA DEL PICAMADEROS DE LAS BELLOTAS, Peter B. Stacey y Walter D. Koenig** Esas aves comparten pareja y crían a sus pollos en grupos.

3 AUTORES

4 HACE...

42 CIENCIA Y SOCIEDAD

106 JUEGOS DE ORDENADOR

112 TALLER Y LABORATORIO

120 LIBROS

124 BIBLIOGRAFIA

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Manuel Puigcerver: *Efectos climáticos de una guerra nuclear* y *Objeto superluminoso en la Gran Nube de Magallanes*; Santiago Torres Martínez: *Proteínas de oncogenes*; Elías Zamora Acosta: *El Templo Mayor de Tenochtitlán*; Carlos Vicente Córdoba: *Fibras ópticas en vegetales*; Heliodoro Ruipérez García: *Manipulación mecánica de partes aleatoriamente orientadas*; Joandomènec Ros: *Reproducción cooperativa del picamaderos de las bellotas*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Manuel Ballester y Enrique Julve

Libros:

Juan-Ramón Lacadena, Ramón Pascual, José A. López Cerezo y José Font Cierco



LA PORTADA

La ilustración de la portada muestra la Piedra de Coyolxauhqui, un enorme disco de piedra esculpido que fue descubierto en la excavación del Templo Mayor de Tenochtitlán, en la ciudad de México (véase "El Templo Mayor de Tenochtitlán", por Eduardo Matos Moctezuma). El Templo Mayor fue un monumento azteca dedicado a Huitzilopochtli, el dios de la guerra, y a Tlaloc, el dios del agua; fue destruido por los españoles tras la conquista del imperio azteca y de su capital Tenochtitlán. De acuerdo con la mitología azteca, Coyolxauhqui era hermana de Huitzilopochtli, quien la mató tras una batalla que tuvo lugar en el cerro de Coatepec. El disco, que mide 3 metros y 25 centímetros de diámetro, muestra el cuerpo desmembrado de la diosa. Cuando se descubrió, el disco estaba roto en dos partes; en el dibujo la fractura ha sido eliminada.

Suscripciones:

Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029-Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 3850 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
350 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
450 pesetas

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009-Barcelona

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029-Barcelona

Publicidad:

Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030-Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91

Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º - 08034-Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Marvin Mattelson

Página	Fuente
7-16	Ian Worpole
21-22	F. Cortés Benavides
23-25	F. Cortés y Ricardo Génova
26	F. Cortés
27	F. Cortés y Ricardo Génova
28	F. Cortés
29	F. Cortés y Ricardo Génova
31	John S. Mathis, Blair D. Savage y Joseph P. Cassinelli, Universidad de Wisconsin en Madison
32	Observatorio Interamericano de Cerro Tololo
33	John S. Mathis, Blair D. Savage y Joseph P. Cassinelli
34-37	Allen Beechel
38	John S. Mathis, Blair D. Savage y Joseph P. Cassinelli
49	G. Steven Martin, Universidad de California en Berkeley
50-53	Ilil Arbel
54	Ilil Arbel (*arriba*); Tony Hunter, Instituto Salk de Estudios Biológicos (*abajo*)
55	Ilil Arbel (*arriba, izquierda*); Tony Hunter

Página	Fuente
	Arbel (*abajo*)
56-58	Ilil Arbel
63-64	Instituto Nacional de Antropología e Historia de México
65-66	Patricia J. Wynne
67	Emily Umberger
68	Instituto Nacional de Antropología e Historia de México (*arriba*); José A. Naranjo, Galería Nacional de Arte (*abajo*)
69-71	José A. Naranjo, Galería Nacional de Arte
75	Dina F. Mandoli y Winslow R. Briggs
76	Ian Worpole
77-82	Tom Prentiss
85	Hank Iken, Walken Graphics
86-87	Gabor Kiss
88-89	Berthold K. P. Horn y Katsushi Ikeuchi, Instituto de Tecnología de Massachusetts
90-94	Gabor Kiss
97	Walter D. Koenig, Universidad de California en Berkeley
98-104	Patricia J. Wynne
107-111	Alan D. Iselin
112	R. F. Bonifield
113	Lorne A. Whitehead

Los autores

RICHARD P. TURCO, OWEN B. TOON, THOMAS P. ACKERMAN, JAMES B. POLLACK y CARL SAGAN ("Efectos climáticos de una guerra nuclear") integran un grupo que ha venido trabajando durante los últimos años en los efectos de la guerra atómica. Turco es director científico de proyectos de R & D Associates Inc. Licenciado por la Universidad de Rutgers, en 1965, se doctoró en ingeniería eléctrica y en física por la de Illinois. Investigador de la atmósfera, su interés se centra en el estudio de las consecuencias a largo plazo de las perturbaciones. Toon, Ackerman y Pollack están adscritos al Centro de Investigación Ames de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). A los tres les preocupan las consecuencias que pueden derivarse de la inyección de materia en forma de partículas en las atmósferas planetarias. Sagan es titular de la cátedra Duncan de astronomía y ciencias espaciales de la Universidad de Cornell. Se formó en la de Chicago, doctorándose en astronomía. Enseñó en la Universidad de Harvard antes de trasladarse a Cornell.

FELIPE CORTES ("Bandeo de cromosomas") enseña citología e histología en la Facultad de Biología de la Universidad de Sevilla, en cuyo centro superior inició su formación, que culminó con el grado de doctor en la Universidad Autónoma de Madrid (1977). Tras varios años de docencia en esta última, volvió a Sevilla con las oposiciones ganadas.

JOHN S. MATHIS, BLAIR D. SAVAGE y JOSEPH P. CASSINELLI ("Objeto superluminoso en la Gran Nube de Magallanes") enseñan astronomía en la Universidad de Wisconsin en Madison. Mathis cursó físicas en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Se recibió de doctor en astronomía por el de California. Tras dos años en el cuerpo docente de la Universidad estatal de Michigan se trasladó a Wisconsin. En 1968 le llegó el nombramiento de catedrático. Savage estudió en la Universidad Cornell, doctorándose por la de Princeton. En ese centro investigó un año, ingresando en 1968 en Wisconsin, de la que es profesor desde 1978. Cassinelli siguió el primer ciclo en la Universidad Xavier; licenciado en física por la Universidad de Arizona, se doctoró en astronomía por la de Washington. Adjunto de investigación durante dos años en el Instituto Conjunto de Astrofísica de Laboratorio, se trasladó a Wisconsin en 1972; accedió a la cátedra en 1981.

TONY HUNTER ("Proteínas de oncogenes"). "Mi interés por la biología, comenta el autor, nace de mi educación en el seno de una familia de médicos. Estudié ciencias naturales en la Universidad de Cambridge, por la que me licencié y doctoré. Disfruté de una beca de investigación del Christ College de Cambridge, gracias a la cual trabajé en el departamento de bioquímica desde 1968 hasta 1971. Me trasladé entonces al Instituto Salk de San Diego, donde, durante dos años, me dediqué al mecanismo de síntesis de ADN en células animales utilizando el virus polioma como modelo. Fue mi primer contacto con los virus cancerígenos, y desde entonces estoy con ellos. Volví al Instituto Salk en 1975, donde ejerzo como profesor desde 1982."

EDUARDO MATOS MOCTEZUMA ("El Templo Mayor de Tenochtitlán") es director general del Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social de Tlalpán, México. Obtuvo su grado de maestría en la Escuela Nacional de Antropología e Historia y prosiguió estudios de licenciatura durante varios años en la Universidad Nacional Autónoma de México. Matos ha llevado a cabo excavaciones en diversos lugares de cultura precolombina de México; la última excavación realizada bajo su supervisión es el objeto de este artículo.

DINA F. MANDOLI y WINSLOW R. BRIGGS ("Fibras ópticas en vegetales") han trabajado en colaboración sobre el tema aquí desarrollado. Mandoli es becaria postdoctoral del departamento de bioquímica de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford. Licenciada en 1976 por el Wellesley College, se doctoró en biología por Stanford con una tesis sobre fotofisiología y las propiedades de las fibras ópticas de las plantas. Briggs dirige el departamento de biología vegetal de la Institución Carnegie de Washington. Se recibió de doctor en biología por la Universidad de Harvard, tras lo cual se vinculó a la facultad de Stanford, de la que fue profesor de biología. Volvió a Harvard para enseñar la misma disciplina en 1967. En 1974 entró en la Institución Carnegie.

BERTHOLD K. P. HORN y KATSUSHI IKEUCHI ("Manipulación mecánica de partes orientadas aleatoriamente") realizaron el trabajo sobre el que versa su artículo cuando ambos se encontraban en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Horn, nacido en Sudáfrica, escribe: "Recibí mi primer título en ingeniería eléctrica por la Universidad de Witwatersrand. Me trasladé luego al MIT, donde participé en la investigación sobre robots prácticamente desde que se iniciara ese programa en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT, a finales de los años 60. Mi trabajo se ha centrado en máquinas de visión". Ikeuchi, japonés, se licenció en 1973 por la Universidad de Kyoto, por la que también es doctor en ingeniería de información (1978). Tras una estancia en los Estados Unidos, investigando durante dos años en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT, volvió a Japón en 1980.

PETER B. STACEY y WALTER D. KOENIG ("Reproducción cooperativa del picamaderos de las bellotas") son zoólogos que, de forma independiente, están haciendo estudios a largo plazo sobre el sistema social de estas aves. Stacey se graduó en Middlebury College, y se licenció y doctoró por la Universidad de Colorado en Boulder. Pasó dos años de estudios postdoctorales en la Universidad de Chicago hasta ocupar el puesto que actualmente desempeña, de profesor ayudante de ciencias biológicas, en la Universidad estatal de Indiana. "En la facultad, Koenig escribe, abandoné pronto mi primera ilusión de llegar a ser astrónomo al tiempo que crecía mi atracción por la historia natural. A la hora de escoger tesis con que doctorarme decidí continuar un proyecto en marcha sobre el picamaderos de las bellotas en la reserva de historia natural de Hastings, del Museo de Zoología de los Vertebrados, que se encuentra en el Valle Superior del Carmel. Conseguido el grado, enseñé en el Occidental College durante un año y volví a Hastings en 1982, como zoólogo ayudante de investigación y profesor adjunto de zoología de la Universidad de Berkeley."

Efectos climáticos de una guerra nuclear

Nuevos descubrimientos respaldan la posibilidad de que las inmensas nubes de humo y polvo que levantaría una guerra nuclear, siquiera de extensión media, provoquen un "invierno nuclear" generalizado

Richard P. Turco, Owen B. Toon, Thomas P. Ackerman, James B. Pollack y Carl Sagan

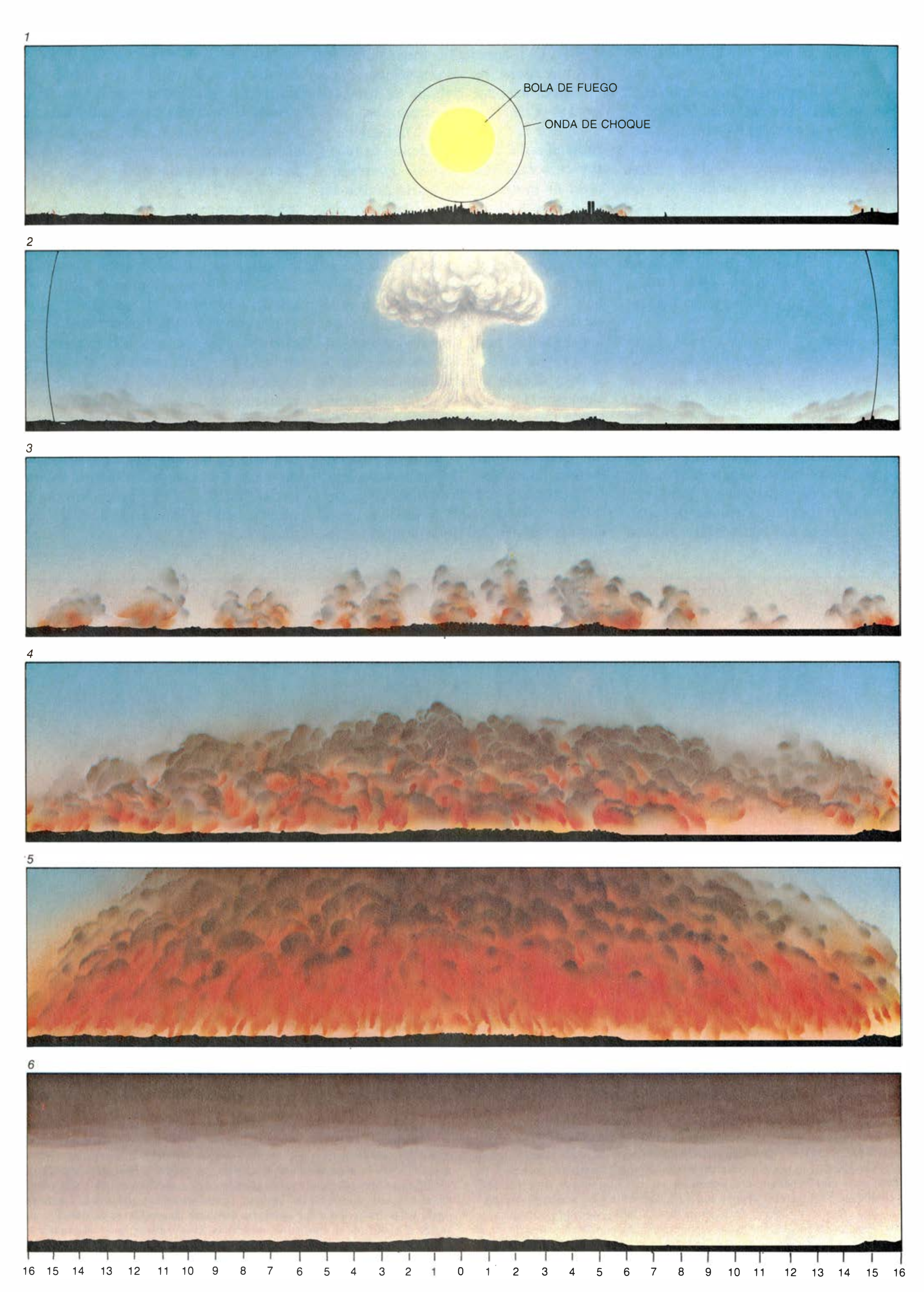
Desde el comienzo de la carrera de armamentos nucleares, hace cuatro decenios, se ha supuesto que la consecuencia más devastadora de una guerra atómica generalizada entre los Estados Unidos y la Unión Soviética sería el ingente número de víctimas humanas en los blancos principales del hemisferio Norte. Aunque, como secuela de tal guerra, se hundirían presumiblemente las estructuras sociales y económicas de los países contendientes, se ha afirmado que la mayoría de las naciones no involucradas –y, con ello, la mayor parte de la humanidad– no peligrarían ni directa ni indirectamente. En el transcurso de los años se ha planteado la posible extensión global de diversos efectos indirectos y a largo plazo de la guerra nuclear: precipitación radiactiva retardada, disminución de la capa protectora de ozono de la atmósfera superior y cambios adversos del clima. Hasta hace poco, no obstante, los contados estudios serios que han abordado esas amenazas han tendido a subestimar su importancia, en algunos casos poniendo énfasis en la incertidumbre inherente a cualquier intento de predecir los efectos combinados de explosiones nucleares múltiples.

Quizá haya llegado la hora de revisar ese punto de vista un tanto optimista del impacto global potencial de una guerra nuclear. Recientes descubrimientos de nuestro grupo, confirmados por investigadores de Europa, de los Estados Unidos y de la Unión Soviética, sugieren que los efectos climáticos a largo plazo de una guerra atómica a gran escala probablemente sean mucho más graves y de mayor alcance de cuanto se había supuesto. Por efecto de tal guerra, vastas regiones de la Tierra podrían quedar sometidas a prolongada oscuridad, temperaturas por debajo de lo común, violentos vendavales, brumas tóxicas y deposición radiactiva persistente: en una palabra, la combinación de condiciones que ha venido a denominarse "invierno nuclear". Los efectos físicos de la guerra atómica se agravarían por los daños generalizados en los sistemas de transporte, redes de distribución eléctrica, producción agraria, elaboración de alimentos, asistencia médica, higiene, servicios civiles y gobierno. Incluso en regiones alejadas del conflicto, los supervivientes padecerían el riesgo de inanición, hipotermia, enfermedades radiactivas, debilitamiento del sistema inmunológico, epidemias y otras horribles consecuencias. Bajo ciertas circunstancias, algunos biólogos, ecólogos en particular, afirman que la extinción de muchas especies de organismos (incluida la especie humana) es una posibilidad verosímil.

Nuestra participación en la nueva valoración de los efectos globales de una guerra nuclear partió de la confluencia de varias líneas de investigación. Antes de unir nuestras fuerzas, habíamos intervenido, individual o conjuntamente, en investigaciones sobre ciertos fenómenos: tempestades de polvo en Marte y efectos climáticos de las erupciones volcánicas en la Tierra; más recientemente, todos nos interesamos por la hipótesis según la cual una o más de las extinciones en masa de especies que se plasman en el registro geológico responderían a la generación de inmensas nubes de polvo por el impacto de un asteroide o de un cometa. En 1982, un comité de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, consciente del paralelismo existente entre el polvo levantado por explosiones nucleares y el que producen otros sucesos cataclísmicos, erupciones volcánicas e impactos meteoríticos, por ejemplo, nos propuso la investigación de los posibles efectos climáticos del polvo que probablemente resultaría de una guerra nuclear. Los autores ya habían tratado la cuestión, y para profundizar en ella tenían a su disposición complejos modelos de ordenador de fenómenos atmosféricos, a gran o pequeña escala; los modelos se habían elaborado a lo largo del decenio anterior, sobre todo, para estudiar los orígenes, propiedades y efectos de las partículas suspendidas en la atmósfera.

Por los mismos años, otro importante aspecto de la cuestión llamaba nues-

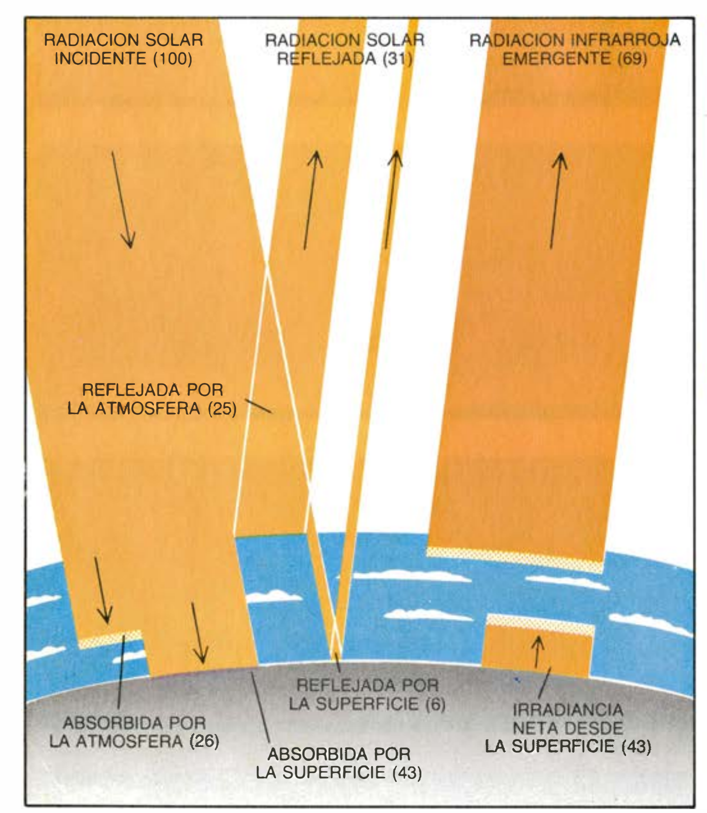
1. TEMPESTAD DE FUEGO formada tras una explosión de un megatón sobre el corazón de Nueva York, desarrollada en una secuencia hipotética de sucesos en la página opuesta (la silueta de la ciudad, vista desde el Oeste, se ha dibujado a escala; el punto de detonación se supone a 2000 metros encima mismo del Empire State Building). En los primeros segundos tras la detonación, el relámpago de radiación térmica emitido por la bola de fuego incendiaría espontáneamente materias combustibles que se encuentren incluso bastante distantes (*1*). La onda expansiva esférica (*arcos negros*) y los fuertes vientos que la acompañan sofocarían pronto muchos incendios, pero esos mismos efectos iniciarían también un gran número de incendios secundarios al destruir la mayoría de las estructuras de la ciudad (*2*). Algunos de los incendios aislados primarios y secundarios podrían combinarse en conflagraciones de importancia (*3*), que a su vez se unirían en un único y enorme fuego que cubriría la mayor parte de la ciudad (*4*). Si tal incendio fuera suficientemente intenso y las condiciones meteorológicas favorables, podría producirse una tempestad de fuego a gran escala, impulsada por vientos de 150 kilómetros por hora, o más, en la vecindad de la corriente ascendente central (*5*). El fuego acabaría agotándose, dejando un rescoldo residual (*6*). El humo y el polvo arrojados a la atmósfera por miles de tales explosiones podrían extenderse sobre una superficie considerable, cerrando el paso a la radiación solar y reduciendo drásticamente la temperatura en superficie, no importa cuál fuera la estación del año. En el caso base estudiado por los autores, una guerra nuclear de 5000 megatones, las tempestades de fuego urbanas inyectan en la estratosfera poco hollín; si tales tempestades de fuego fuesen corrientes en una guerra, el invierno nuclear resultante de la conflagración sería mucho más duro que el pronosticado por los modelos de ordenador.

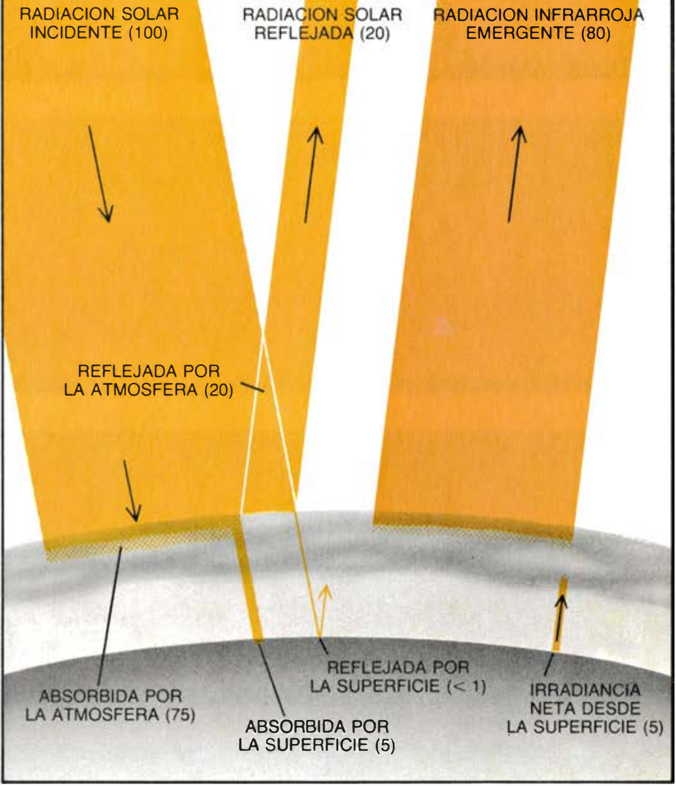

1
BOLA DE FUEGO
ONDA DE CHOQUE
2
3
4
5
6
16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
DISTANCIA DESDE EL PUNTO DE EXPLOSION (KILOMETROS)

tra atención. En un artículo publicado en la revista sueca del medio ambiente *Ambio*, del que eran autores Paul J. Crutzen, del Instituto Max Planck de Química de Maguncia (Alemania Occidental), y John W. Birks, de la Universidad de Colorado en Boulder, leíase que los incendios provocados por explosiones nucleares podrían originar enormes cantidades de humo, atenuando sensiblemente la luz solar que llega al suelo. En consecuencia, añadimos el humo al polvo como probable influencia perturbadora de una guerra nuclear sobre el clima.

En resumen, nuestros primeros resultados, publicados en *Science* en diciembre de 1983, mostraban que "las consecuencias potenciales globales, tanto atmosféricas como climáticas, de la guerra nuclear... son serias. El fino polvo levantado por potentes explosiones nucleares en superficie y el humo de los incendios urbanos y forestales provocados por explosiones de cualquier potencia en la atmósfera pueden causar una apreciable atenuación del flujo de radiación solar y temperaturas en superficie por debajo de los cero grados Celsius". Encontramos, además, que la exposición prolongada a la radiación nuclear procedente de la deposición radiactiva de una guerra nuclear en el hemisferio Norte podría ser un orden de magnitud mayor de lo que indicaban anteriores estudios; la radiactividad, como los otros efectos del invierno nuclear, podrían incluso penetrar profundamente en el hemisferio Sur. "Cuando se combinan con la rápida destrucción de la explosión nuclear, los incendios, la deposición y el aumento ulterior de la radiación solar ultravioleta debido al debilitamiento de la capa de ozono", concluíamos, "la exposición durante largo tiempo al frío, oscuridad y radiactividad podría suponer una seria amenaza contra los supervivientes humanos y de otras especies". Resultados de estudios posteriores, basados en modelos más potentes sobre la circulación general de la atmósfera terrestre, reflejaron una tendencia a confirmar tanto la validez del enfoque de nuestra investigación como la línea principal de nuestros descubrimientos. A continuación pasaremos revista al estado actual de nuestros conocimientos sobre esta cuestión vital.

Para comprender los efectos climáticos de una guerra nuclear debe primero analizarse cómo suele alcanzarse el balace de radiación en la Tierra. La cantidad de radiación solar absorbida por la atmósfera y la superficie de la Tierra, promediada para un período de tiempo largo, es igual a la cantidad de radiación térmica emitida y devuelta al espacio. Puesto que la intensidad de la radiación térmica varía en proporción a la cuarta potencia de la temperatura, tanto la temperatura de la superficie como la de la atmósfera pueden ajustarse con bastante rapidez para mantener el balance global entre la energía solar ganada y la energía térmica perdida.



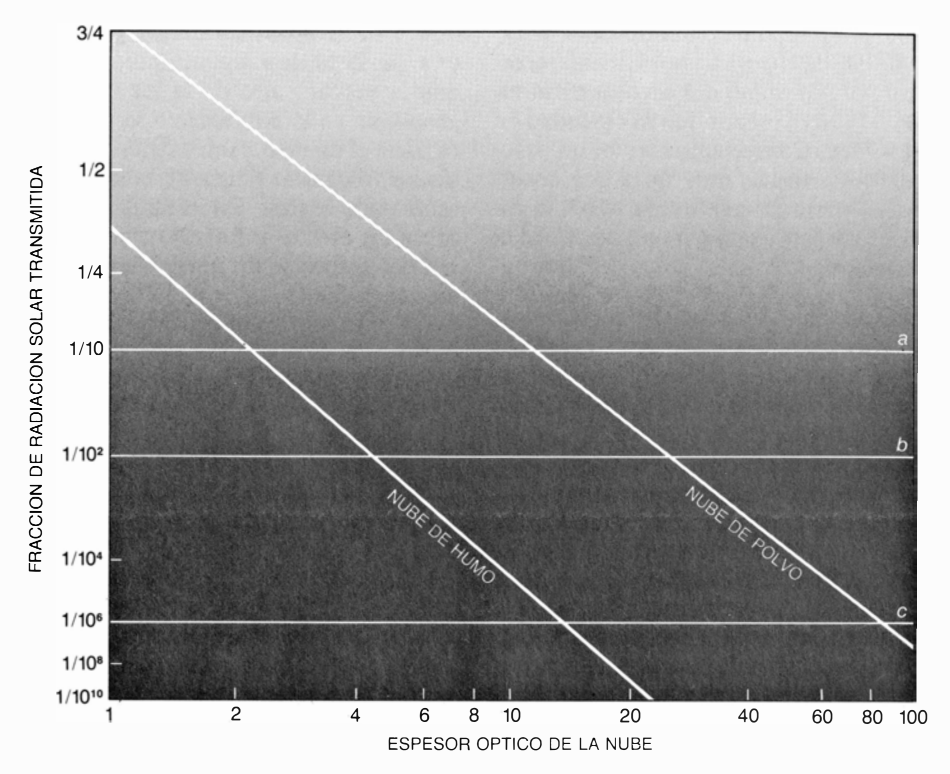


2. POR EL EFECTO DE INVERNADERO se calienta la superficie terrestre gracias a las propiedades aislantes de la atmósfera; dicho fenómeno se anularía a lo largo de una extensa superficie debido a la nube de humo y polvo generada por una guerra nuclear. Bajo condiciones normales (*izquierda*), la atmósfera es casi transparente a la radiación a las longitudes de onda visibles; en consecuencia, una gran proporción de la radiación solar incidente atraviesa la atmósfera y se absorbe en la superficie en forma de energía térmica, o calor. La radiación térmica de la superficie se emite predominantemente a longitudes de onda más largas, en el infrarrojo; la baja atmósfera las absorbe, elevando la temperatura cerca del suelo hasta unos valores muy por encima del punto de fusión del hielo. En condiciones normales, el balance neto de calor en el suelo es la diferencia entre una irradiancia infrarroja hacia abajo de 101 unidades y una irradiancia hacia arriba de 144 unidades; este último valor se descompone, a su vez, en una irradiancia infrarroja hacia arriba de 115 unidades más un flujo de calor "sensible" y latente que totaliza 29 unidades. La energía absorbida por la atmósfera y la superficie en forma de radiación solar, promediada a lo largo del tiempo, es igual a la energía devuelta al espacio desde la superficie y la atmósfera en forma de radiación infrarroja. Una densa nube de humo y polvo situada en la atmósfera media o alta alteraría el balance energético del sistema Tierra-atmósfera (*derecha*). La mayor parte de la radiación solar quedaría entonces absorbida en la nube; y una buena fracción de la misma se reemitiría directamente hacia el espacio en forma de radiación infrarroja, sin siquiera alcanzar la superficie. En esas condiciones perturbadas, el balance neto de calor en el suelo sería la diferencia entre una irradiancia infrarroja hacia abajo de 65 unidades y una irradiancia hacia arriba de 70 unidades; las dos irradiancias se compensarían, anulando cualquier efecto de calentamiento por parte de la atmósfera. La superficie y la baja atmósfera se enfriarían al disiparse el calor residual.

Si la Tierra fuese un cuerpo sin atmósfera, como la Luna, su superficie emitiría la radiación solar absorbida directamente al espacio. En este caso, la temperatura de la Tierra, promediada globalmente, sería bastante inferior al punto de fusión del hielo, y la vida, tal como la conocemos, no podría existir en nuestro planeta. Para nuestra fortuna, la Tierra tiene una atmósfera que absorbe y aprisiona parte del calor emitido por la superficie, elevando con ello la temperatura media a nivel del suelo hasta un valor muy por encima del punto de fusión del hielo y proporcionando un entorno favorable para formas de vida que se sirven del agua líquida, como la nuestra.

¿Por qué se habla del aislamiento térmico de la superficie terrestre debido a la atmósfera (el "efecto de invernadero")? Porque la radiación solar atraviesa la atmósfera más fácilmente de lo que lo hace la radiación térmica. La radiación emitida por el Sol se encuentra principalmente en la parte visible del espectro electromagnético, mientras que la radiación térmica emitida por la superficie terrestre se concentra en la parte infrarroja. Los principales componentes absorbentes de infrarrojo de la atmósfera son el agua (en las formas de cristales de hielo, gotículas líquidas y vapor) y el dióxido de carbono, ambos esencialmente transparentes a la luz visible. De ahí que la atmósfera, en general, actúe como una ventana para la radiación solar y como una manta para la radiación infrarroja.

En condiciones normales, la temperatura de la troposfera, o baja atmósfera, decrece gradualmente al crecer la altura hasta aproximadamente 12 kilómetros, límite llamado tropopausa. El calor de la superficie terrestre se transporta hacia arriba atravesando la atmósfera mediante diversos mecanismos: la radiación térmica, la turbulencia a pequeña escala, la convección a gran escala y la liberación de calor latente mediante la condensación de vapor de agua ascendente. En una atmósfera puramente radiactiva (es decir, donde el aire no se mueva verticalmente y en la que toda la energía se transmita por radiación) las capas inferiores del aire, donde se absorbe la mayor parte de la energía solar, estarían más calientes que las capas altas; en esta situación, la radiación térmica dirigida hacia arriba sería superior a la radiación térmica dirigida hacia abajo, permitiendo que el exceso de calor escapase al espacio. Si la opacidad de la atmósfera a la radiación infrarroja aumentase (sin variar la opacidad a la luz visible), la temperatura aumentaría.



3. TRANSMISION DE LA RADIACION SOLAR a través de nubes de polvo y de humo representada en este gráfico en función del espesor óptico de cada nube, una medida de la opacidad equivalente al logaritmo neperiano, cambiado de signo, de la atenuación de un haz de luz incidente. Para un espesor óptico dado, una nube de humo absorbe, evidentemente, mucha más radiación solar que una nube de polvo. Por comparación, se dan tres niveles típicos de luz transmitida: corresponden a un día cubierto de nubes (*a*), un nivel de luz en el que la fotosíntesis es apenas posible (*b*) y una noche clara de luna llena (*c*).

Por ejemplo, si se añadiese a la atmósfera dióxido de carbono (un buen absorbente infrarrojo) en cantidades suficientes, se calentaría la superficie.

Inversamente, si algún componente de la atmósfera redujera la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie sin aumentar apreciablemente la opacidad al infrarrojo, la temperatura en el suelo descendería. Por ejemplo, si toda la radiación solar se absorbiera en la alta atmósfera y no llegase al suelo, y si la superficie pudiese radiar energía al espacio sin impedimento, la temperatura de la superficie descendería hasta la que corresponde a un planeta carente de atmósfera. Si la absorción de energía solar se diera por encima de la mayor parte de la atmósfera, el balance de radiación de la Tierra se equilibraría sin necesidad de efecto de invernadero (lo que nos faculta para llamar a esta condición "efecto de antiinvernadero"). Bajo la capa de aire donde se absorbiera la energía solar, la temperatura de la atmósfera no variaría con la altura: en cada nivel inferior, el flujo de radiación infrarroja hacia arriba igualaría el descendente, y el intercambio de energía sería despreciable.

Las partículas de la atmósfera pueden afectar el balance de radiación de la Tierra de varias maneras: absorbiendo radiación solar, reflejándola hacia el espacio y absorbiendo o emitiendo radiación infrarroja. En general, una nube de finas partículas (un aerosol) tiende a calentar la capa atmosférica que ocupa, pero calentará o enfriará las capas subyacentes y la propia superficie según las partículas absorban radiación infrarroja más fácilmente de lo que reflejan o absorban luz visible.

El efecto antiinvernadero de un aerosol se hace máximo para partículas altamente absorbentes en longitudes de onda visibles. Así, llega mucha menos radiación solar a la superficie si un aerosol está compuesto por partículas oscuras, como el hollín, que absorben fuertemente la luz visible, que si se trata de un aerosol constituido por partículas brillantes, como las del polvo del suelo, que principalmente difunden la luz. Para evaluar, pues, los posibles efectos climáticos de una guerra nuclear debe prestarse particular atención a las partículas de hollín originadas por los incendios, ya que el hollín es una de las pocas materias corrientes que, en forma de partículas, absorbe la luz visible mucho más intensamente que la radiación infrarroja.

La cuantía con la que el aerosol enfriará la superficie (impidiendo el paso de la radiación solar) o la calentará (reforzando el efecto de invernadero) depende del tamaño de las partículas. Si el diámetro de las partículas es menor

que la longitud de onda típica de la radiación infrarroja (unos 10 micrometros), la opacidad del aerosol en el infrarrojo será menor que su opacidad en el visible. Consecuentemente, un aerosol de partículas muy finas que absorba, siquiera de una forma débil, la radiación solar, producirá un efecto en el visible mayor que su efecto en el infrarrojo, dando lugar a un apreciable enfriamiento de las capas atmosféricas más bajas y de la propia superficie. En el caso del hollín, ello es cierto incluso para partículas algo mayores.

Los efectos sobre la radiación visible e infrarroja asociados a capas de partículas tienen también que ver con el espesor y densidad del aerosol. La intensidad de la radiación solar que alcanza el suelo decrece exponencialmente con la cantidad de materia en forma de partículas finas y absorbentes de la atmósfera. Por otra parte, la cantidad de radiación infrarroja que llega al suelo depende más de la temperatura del aire que de la cantidad de aerosol. De ahí que, cuando existe una gran cantidad de aerosol, la consecuencia climática dominante tiende a ser un intenso enfriamiento en superficie.

El "espesor óptico" de un aerosol (una medida de la opacidad igual al logaritmo neperiano, cambiado de signo, de la atenuación de un haz de luz incidente por absorción y difusión) sirve de indicador conveniente de los efectos climáticos potenciales del aerosol. Así, una nube con un espesor óptico muy inferior a la unidad sólo causará perturbaciones menores, ya que la mayor parte de la luz alcanzará la superficie; por contra, una nube con un espesor óptico de la unidad o mayor generará una perturbación importante, puesto que la mayor parte de la luz quedará absorbida en la atmósfera o se difundirá hacia el espacio. Aun cuando las partículas volcánicas tienen un tamaño óptimo para realzar los efectos visibles sobre los efectos infrarrojos, la magnitud del enfriamiento superficial inducido queda limitada por el moderado espesor óptico de los aerosoles volcánicos (inferior al 0,3) y por la muy débil absorción intrínseca a longitudes de onda del visible. Sin embargo, las nubes volcánicas mayores pueden perturbar el balance radiativo de la Tierra lo suficiente para producir un tiempo anómalo. Las enormes nubes de polvo que arrojaría a la atmósfera el impacto de un asteroide o un cometa con un diámetro de varios kilómetros o más podrían producir efectos climáticos mucho más importantes. Esas nubes de polvo podrían tener un espesor óptico muy grande, tal vez cercano a mil en el comienzo.

Los efectos radiativos de un aerosol sobre la temperatura de un planeta dependen no solamente del espesor óptico del aerosol, su absorción en el visible y el tamaño medio de sus partículas, sino también de la variación de esas propiedades con el tiempo. Cuanto más tiempo se mantenga un espesor óptico importante, tanto más cerca se moverán la temperatura en superficie y la de la atmósfera hacia un nuevo estado de equilibrio. Normalmente, la superficie del océano tarda varios años en responder a variaciones del balance global de radiación, dada la gran capacidad calorífica de la capa más alta y mezclada del mar, que se extiende hasta una profundidad de unos 100 metros. Por el contrario, la temperatura del aire y la temperatura de las masas de tierra continentales alcanzan nuevos valores de equilibrio en sólo unos pocos meses. De hecho, cuando la atmósfera se enfría fuertemente, la convección por encima de la superficie cesa y la temperatura del suelo decrece rápidamente por enfriamiento radiativo, alcanzando el equilibrio en pocos días o semanas. Ello sucede de manera natural cada noche, aunque en un período tan corto no se alcanza el equilibrio.

Las partículas se ven eliminadas de la atmósfera por varios procesos: deposición bajo la influencia de la gravedad, adherencia al suelo y a otras superficies y lavado por nubes de agua, por la lluvia y por la nieve. El tiempo de vida de las partículas frente a la eliminación "húmeda" depende de la frecuencia de formación de nubes y la precipitación a varias altitudes. En los primeros kilómetros de altura, en la atmósfera normal, las partículas pueden eliminarse por lavado en cuestión de días. En la alta troposfera (por encima de cinco kilómetros) el tiempo medio de vida de las partículas aumenta hasta varias semanas o más. Todavía más arriba, en la estratosfera (por encima de 12 kilómetros), raramente se forman nubes de agua, de modo que la vida media de partículas pequeñas se cifra en un año o más. La eliminación estratosférica tiene lugar principalmente por precipitación gravitatoria y por transporte convectivo a gran escala de las partículas. La deposición de partículas sobre

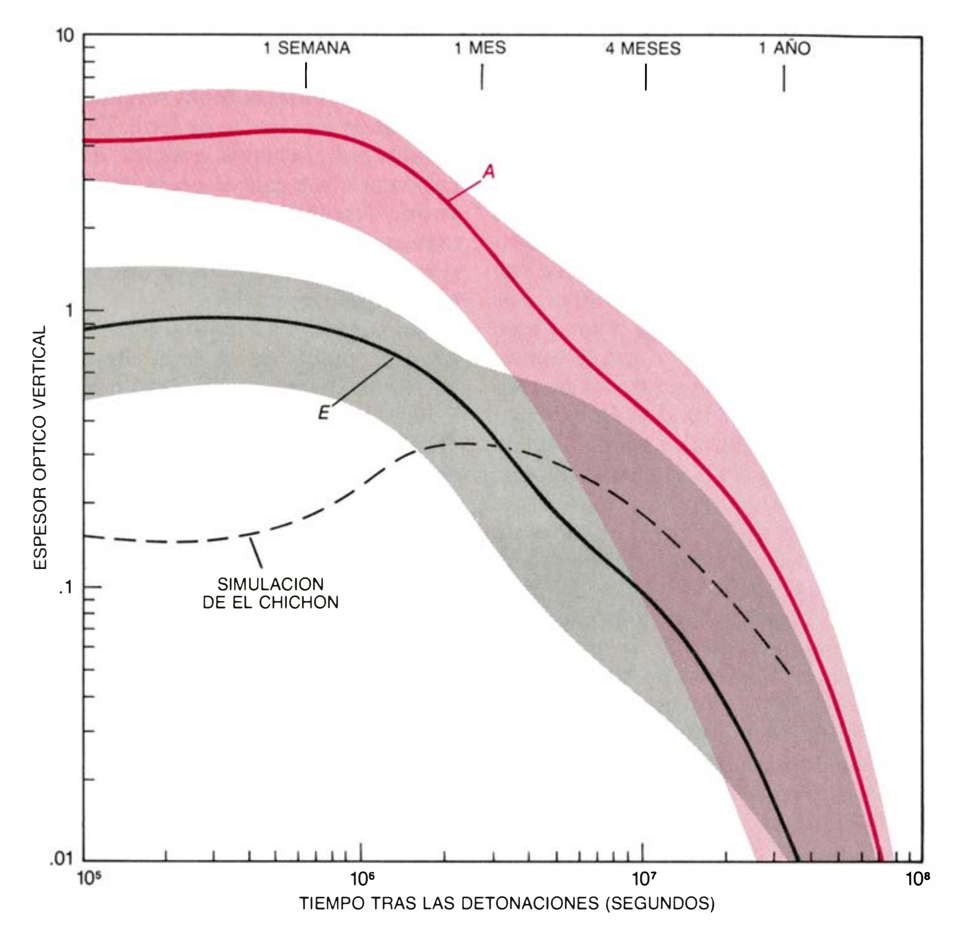
	CASO	POTENCIA TOTAL (MEGATONES)	EXPLOSIONES SUPERFICIALES (% DE LA POTENCIA TOTAL)	BLANCOS URBANOS O INDUSTRIALES (% DE LA POTENCIA TOTAL)	POTENCIA DE LAS CABEZAS NUCLEARES (MEGATO.)	NUMERO TOTAL DE EXPLOSIONES	MASA DE HUMO SUBMICROMETRICO (MILLONES DE TONELADAS)	MASA DE POLVO SUBMICROMETRICO (MILLONES DE TONELADAS)	ESPESOR OPTICO DEL HUMO	ESPESOR OPTICO DEL POLVO
A	INTERCAMBIO BASICO	5,000	57	20	.1–10	10,400	225	65	4.5	1
B	EXPLOS. AEREAS BAJA POTENCIA	5,000	10	33	.1–1	22,500	300	15	6	.2
C	ATAQUE A GRAN ESCALA	10,000	63	15	.1–10	16,160	300	130	6	2
D	ATAQUE A ESCALA INTERMEDIA	3,000	50	25	.3–5	5,433	175	40	3.5	.6
E	ATAQUE LIMITADO	1,000	50	25	.2–1	2,250	50	10	1	.1
F	ATAQUE GENERAL CONTRAFUERZAS	3,000	70	0	1–10	2,150	0	55	0	.8
G	ATAQUE CONTRA BLANCOS PROTEGIDOS	5,000	100	0	5–10	700	0	650	0	10
H	ATAQUE URBANO	100	0	100	.1	1,000	150	0	3	0
I	GUERRA FUTURA	25,000	72	10	.1–10	28,300	400	325	8	5

4. VARIOS CASOS DE GUERRA NUCLEAR esquematizados, extraídos de una relación de posibilidades mucho mayor estudiada por los autores. Las últimas cuatro columnas de la derecha dan el resultado de cada caso en términos de las nubes de humo y polvo producidas por las detonaciones e incendios. Todos los casos que aquí se muestran, excepto el último, caen dentro de las actuales posibilidades de los Estados Unidos y de la Unión Soviética.

superficies es muy poco eficaz para partículas de humo y polvo de tamaño medio; requiere varios meses para una reducción importante en su concentración.

La altura hasta donde se inyectan las partículas se relaciona con su tiempo de residencia. En general, cuanto mayor sea la altura inicial, tanto más se prolonga el tiempo de residencia en la atmósfera normal. Sin embargo, unas inyecciones de hollín y polvo enormes pueden alterar profundamente la estructura de la atmósfera y la velocidad de eliminación de las partículas.

En nuestro análisis de los efectos climáticos de una guerra nuclear hemos adoptado buen número de casos específicos, basados en lo que se conoce acerca de los efectos de distintas explosiones atómicas, el tamaño y distribución de los actuales arsenales nucleares y los planes de los Estados Unidos y de la Unión Soviética en caso de guerra. Entre las varias docenas de casos que hemos analizado se cuentan un ataque "contra valores", de 100 megatones, dirigido estrictamente hacia ciudades, un ataque de 3000 megatones "contra fuerzas", dirigido estrictamente hacia silos de misiles, y un ataque de 10.000 megatones, o "guerra en gran escala", dirigido contra un panel de blancos en ambos lados. Nuestro "caso base", de comparación, es un disparo mutuo de 5000 megatones, en el que un 20 por ciento de la potencia explosiva total afectaría a zonas urbanas, suburbanas e industriales. Todos los casos de ataque postulados caben perfectamente en las actuales posibilidades de ambas superpotencias.



5. VARIACION DE LA OPACIDAD EN EL TIEMPO para las nubes de polvo y humo resultantes de cierto número de casos de guerra nuclear, representada aquí en términos del espesor óptico vertical de las nubes promediado para el hemisferio Norte. Los espesores ópticos se calcularon para la luz visible a una longitud de onda de 550 nanómetros. Los resultados tienden a caer en dos bandas. La banda superior incluye aquellos casos que dieron resultados próximos al arquetipo de 5000 megatones de los autores, indicado por la curva de trazo continuo en color; la potencia total explosiva de los casos de esa banda se extiende de 100 a 10.000 megatones. La banda inferior incluye los casos que dieron resultados menos espectaculares; los casos de esta banda se extienden desde el intercambio limitado de 1000 megatones indicado por la curva negra hasta un ataque contrafuerzas de 3000 megatones, dirigido a objetivos militares solamente. Son de esperar desajustes climáticos importantes siempre que el espesor óptico medio sobre un hemisferio supere, aproximadamente, la unidad. El espesor óptico medio sobre el hemisferio Norte de la nube de polvo levantada por la erupción del volcán El Chichón, en 1982, sirve de referencia.

La explosión nuclear provoca incendios, tanto en un entorno urbano como en uno rural. El relámpago de radiación térmica de la explosión nuclear, que tiene un espectro similar al de la radiación solar, da cuenta, aproximadamente, de un tercio de la totalidad de la energía liberada en la explosión. La propia intensidad del relámpago desencadena el incendio espontáneo de múltiples materiales combustibles a distancias de 10 o más kilómetros de una explosión aérea de un megatón detonada a una altura nominal de un kilómetro. La onda expansiva de la explosión extinguiría muchos de los incendios iniciales, pero también iniciaría numerosos incendios secundarios, desviando llamas, destrozando conducciones de gas y depósitos de combustibles y produciendo chispas eléctricas y mecánicas. La destrucción resultante de la onda expansiva dificultaría también la efectividad de la lucha contra los incendios y ayudaría así a la propagación de primarios y secundarios. Basándose en los efectos incendiarios conocidos de las explosiones nucleares de Hiroshima y Nagasaki, en 1945, puede estimarse que los incendios que probablemente causaría una sola de las armas estatégicas nucleares, mucho más potentes, disponibles hoy día se extendería sobre un área de entre decenas y centenares de kilómetros cuadrados.

Las explosiones nucleares detonadas sobre bosques y praderas prenderían también grandes incendios, pero la situación en ese caso es más difícil de evaluar. Entre los factores que influyen en los incendios a campo abierto se cuentan la humedad, el contenido de vapor de agua del combustible, la cantidad de éste y la velocidad del viento. Aproximadamente una tercera parte de la superficie de las tierras de la zona templada septentrional está cubierta de bosques; una superficie igual está cubierta de monte bajo y pradera. Se sabe de violentos incendios forestales que, desde unos pocos focos, se han propagado a lo largo de decenas de millares de kilómetros cuadrados; en ausencia de guerra nuclear, tales incendios suelen darse una vez por década. Aunque la mayoría de los incendios generados por explosiones nucleares en campo abierto se confinarían probablemente al área inmediata expuesta al intenso relámpago térmico, quizás otros mucho mayores se iniciasen por efecto de explosiones múltiples sobre objetivos militares dispersos, por ejemplo, silos de misiles.

La cantidad total de humo que probablemente genere una guerra nuclear depende, entre otras cosas, de la cantidad total de armas que se detonen sobre cada tipo de blanco, la eficacia de las explosiones en provocar incendios, el área media incendiada por megatón

explotado, la cantidad media de material combustible de la región irradiada, la fracción de material combustible consumida por los fuegos, la cantidad de humo producida por cada unidad de combustible quemado y la fracción de humo que, con el tiempo, se incorpora a la circulación atmosférica global después de que la lluvia local se quede con su parte. Asignando los valores más probables a esas variables para el caso de una guerra nuclear en que se usaran menos del 40 por ciento de los arsenales estratégicos de las dos superpotencias, calculamos que la emisión total de humo subsiguiente a un ataque nuclear con su represalia correspondiente excedería, fácilmente, los cien millones de toneladas métricas. En muchos aspectos, es una estimación moderada. Crutzen y sus colaboradores Ian Galbally, de la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (CSIRO) en Australia, y Christoph Brühl, del Instituto Max Planck de Maguncia, acaban de concluir que la emisión total de humos debida a una guerra nuclear a gran escala rondaría los 300 millones de toneladas.

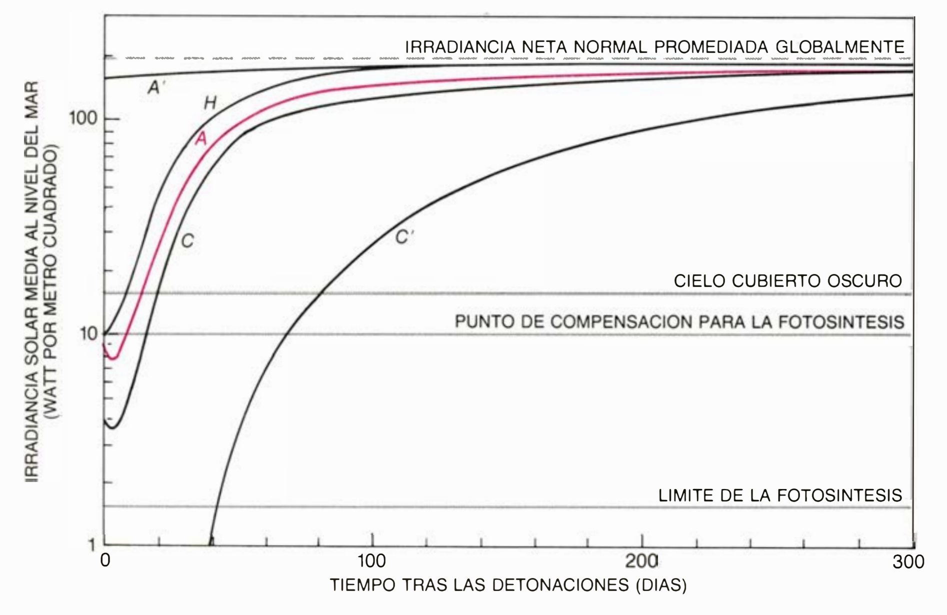
Cien millones de toneladas de humo, distribuidas de manera uniforme sobre la totalidad del globo, podrían reducir la intensidad de la radiación solar que llega al suelo hasta en un 95 por ciento. Las nubes iniciales, sin embargo, no cubrirían la tierra entera; grandes regiones del hemisferio Norte, particularmente en las zonas de los blancos, estarían aún más oscuras; a mediodía, el nivel de luz en esas zonas sería comparable al de una noche de luna. De persistir durante semanas o meses, una oscuridad de ese calibre en horas de luz podría desencadenar una catástrofe climática. De hecho, cantidades muy inferiores de humo podrían ya causar perturbaciones apreciables.

Los incendios a campo abierto suelen inyectar humo en la baja atmósfera hasta una altura de unos cinco o seis kilómetros. En contraste, se sabe que grandes incendios urbanos han inyectado humo en la troposfera superior, a alturas de hasta 12 kilómetros, probablemente. La escala sin precedentes de los incendios que desencadenarían las grandes explosiones nucleares y la compleja actividad convectiva generada por explosiones múltiples quizás impulsasen humo todavía más arriba. Estudios de la dinámica de macroincendios sugieren que los penachos de humo podrían alcanzar hasta 20 kilómetros de altura, dentro de la estratosfera.

Durante el bombardeo de Hamburgo, en la segunda guerra mundial, el centro de la ciudad quedó destruido por una intensa tempestad de fuego; vientos de fuerza huracanada, generados por el calor, barrieron la ciudad, a ras del suelo, hacia el centro desde todas direcciones. El súbito desprendimiento de calor en una zona grande puede crear vórtices de fuego, tornados de calor y ciclones con columnas convectivas muy altas. La propia intensidad de tales incendios tendería a reducir considerablemente la emisión de humos mediante dos procesos: la oxidación de partículas carbonadas del humo a las extremadamente altas temperaturas originadas por el propio incendio y el lavado de partículas de humo por la precipitación formada en la columna convectiva. Ambos efectos se tomaron en cuenta en nuestras estimaciones de la emisión total de humo en una guerra nuclear.

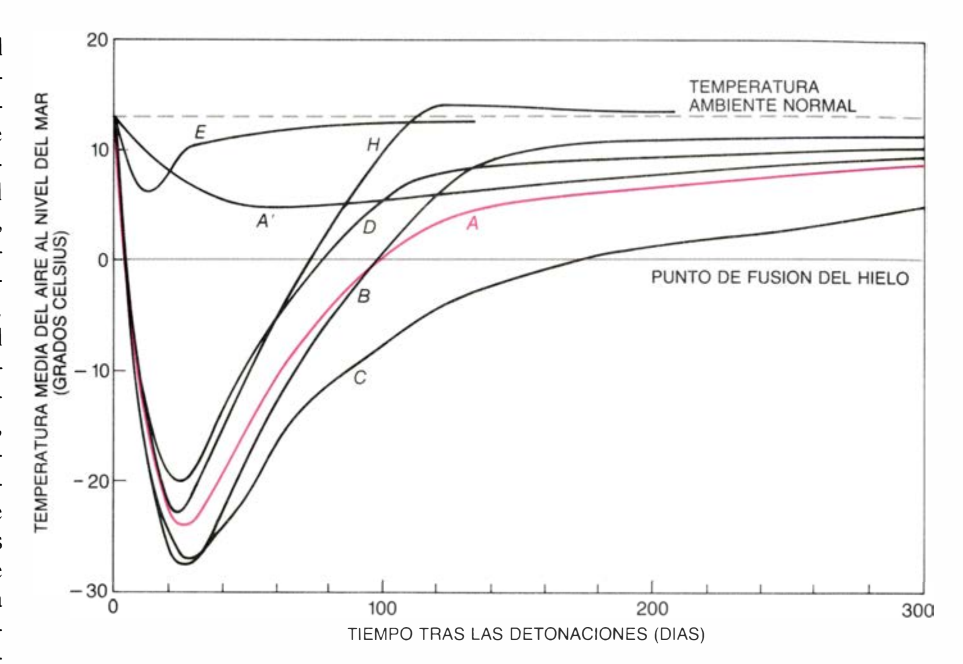
El impacto climático del humo depende de sus propiedades ópticas, que a su vez son función del tamaño, forma y composición de las partículas. El humo que mejor tamiza la luz es el constituido por partículas de un radio aproximado de 0,1 micrometros y composición rica en grafito y semejante al hollín. El humo menos eficaz para atenuar la radiación solar está formado por partículas de tamaño superior a 0,5 micrometros, con composición predominantemente aceitosa. El humo de un incendio forestal lo integran partículas aceitosas extremadamente finas, mientras que el humo de un incendio urbano se nutre de agregaciones mayores de partículas de hollín. El humo de incedios devoradores suele contener grandes partículas de ceniza, alquitrán, polvo y otros residuos, todo ello barrido por los vientos generados por el calor. Las mayores de esas partículas caen de la nube de humo a poca distancia, viento abajo, del incendio. Aunque los incendios muy intensos producen menos humo, levantan más polvo fino y queman metales como el aluminio y el cromo, que generan finos aerosoles.

El desprendimiento de compuestos tóxicos en incendios urbanos no ha recibido todavía la atención necesaria. Es bien conocido que muchas víctimas de incendios accidentales murieron por envenenamiento con gases tóxicos. Además del monóxido de carbono, que se produce copiosamente en muchos incendios, el cianuro de hidrógeno y el cloruro de hidrógeno se originan al quemarse materiales sintéticos de los modernos edificios y mobiliarios. Si en un conflicto nuclear se desprenden y queman grandes cantidades de compuestos orgánicos, se crearían otras toxinas, que pasarían al aire. La posibilidad de que se contaminaran grandes zonas con tales pirotoxinas, adsorbidas a las superficies de las partículas de humo, cenizas y polvo y arrastradas a grandes distancias por los vientos, precisa investigación ulterior.



6. VARIACION DE LA CANTIDAD DE RADIACION SOLAR que alcanza el suelo a través de una nube extensa de humo y polvo creada por una guerra nuclear en varios de los casos considerados por los autores. Cada curva señala la irradiancia media del suelo en el hemisferio Norte para un caso dado. Las irradiancias corresponden a nubes de humo promediadas horizontalmente y no tienen en cuenta la posibilidad de que la cobertura sea parcial. La curva en color corresponde al caso básico de 5000 megatones (*curva A*). La curva *A'* es una variante del caso básico que recoge sólo los efectos del polvo. La *C'* es una variante de intercambio a gran escala de 10.000 megatones que asigna valores más extremos a las variables de emisión de humos. Se indica también el nivel energético para el cual la fotosíntesis no puede mantenerse al compás de la respiración de una planta típica (nivel que se conoce como punto de compensación) y el nivel energético en que cesa la fotosíntesis. Esos dos niveles varían bastante entre plantas.

Las explosiones nucleares a ras del suelo, o en su vecindad, levantan ingentes cantidades de polvo. Los principales mecanismos generadores de polvo comprenden la expulsión y disgregación de partículas del suelo del propio cráter formado por la explosión, la vaporización y subsiguiente condensación de suelo y roca, y el levantamiento de polvo y humo superficial. Una explosión de un megatón sobre el suelo puede excavar un cráter de cientos de metros de diámetro, eyectar varios millones de toneladas de materia, elevar entre 100.000 y 600.000 toneladas de suelo hasta gran altitud e inyectar entre 10.000 y 30.000 toneladas de partículas de polvo submicrométricas en la estratosfera. La altura a la que se inyecta el polvo depende de la potencia de la explosión: las nubes de polvo producidas por explosiones con una potencia inferior a 100 kilotones no penetrarán generalmente en la estratosfera, mientras que las provinientes de explosiones con una potencia superior al megatón se estabilizarán principalmente en la estratosfera. Las explosiones por encima del suelo pueden elevar también grandes cantidades de polvo, aspirado desde la superficie por la bola de fuego ascendente. El efecto combinado de explosiones múltiples podría incrementar la cantidad total de polvo elevado a grandes altitudes.



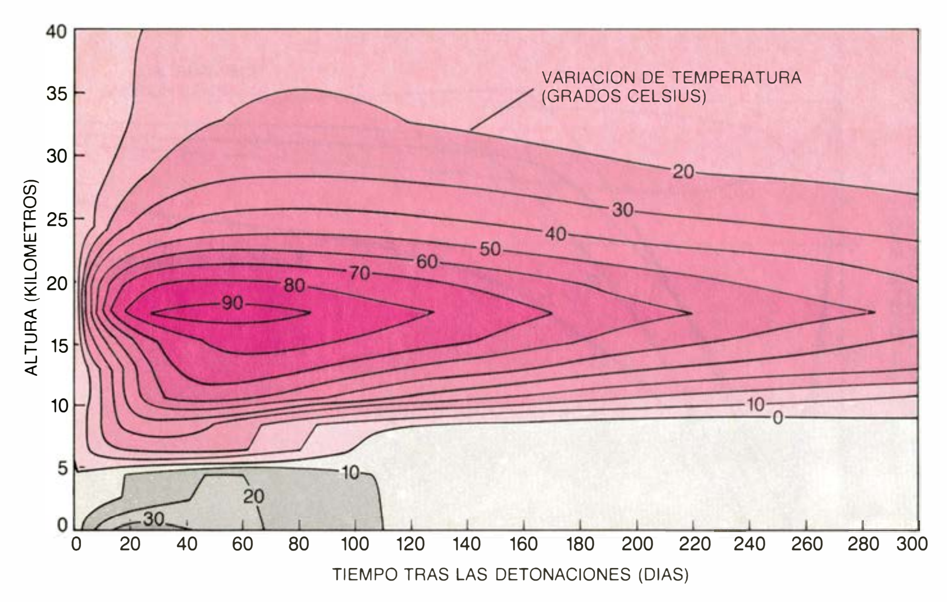
7. VARIACIONES DE TEMPERATURA a ras de suelo en el hemisferio Norte, representadas en función del tiempo para diversos casos. De nuevo, la curva en color corresponde al caso básico de 5000 megatones empleado por los autores. En general, el humo de la troposfera (por debajo de 12 kilómetros) tendría un efecto sustancial de enfriamiento a corto plazo, mientras que el polvo de la estratosfera (por encima de 12 kilómetros) provocaría una tendencia al enfriamiento, menos intensa pero más duradera. La disminución media de temperatura calculada en cada caso es probablemente la mayor que podría registrarse, y ello sólo en las regiones interiores de los continentes. La temperatura sobre el océano bajaría sólo unos pocos grados Celsius, o quizá menos. La mezcla de las masas de aire continentales y marítimas podría dar, por tanto, un descenso menor de temperatura sobre el suelo, particularmente en las regiones costeras. El mismo fenómeno, sin embargo, conduciría también a prolongadas y fuertes tormentas costeras. Los cambios de temperatura representados en esta gráfica se han promediado para las diversas estaciones. Si la guerra tuviera lugar en verano, el descenso de temperatura sería mayor que el indicado en cada caso, y lo contrario sucedería si la guerra se produjese en invierno. Una disminución de temperatura de sólo unos pocos grados puede dañar gravemente la agricultura. En un número de casos muy grande se registran descensos hasta los 20 grados Celsius bajo cero o más, y la temperatura tarda meses en volver a cero.

La cantidad de polvo producido en una guerra nuclear dependería de manera crítica de la forma en que se usasen las armas. Las explosiones en el suelo estarían dirigidas a blancos protegidos, verbigracia, silos de misiles y puestos de mando subterráneos. Los blancos débilmente protegidos se atacarían tanto por explosiones en el aire como por explosiones en superficie. Hay más de 1000 silos de misiles sólo en los Estados Unidos continentales, a cada uno de los cuales probablemente apuntan dos cabezas nucleares soviéticas, por lo menos. Alrededor de 1400 silos de misiles rusos están análogamente vigilados por cabezas nucleares estadounidenses. Las bases aéreas y aeródromos secundarios, bases de submarinos y puestos de mando y control se cuentan entre los muchos otros blancos estratégicos a los que se podrían asignar explosiones superficiales. En resumen, parece verosímil que se detonaran al menos 4000 megatones de armas de alta potencia, en o cerca del suelo, incluso en una guerra nuclear en la que no se atacasen las ciudades: se inyectarían aproximadamente 120 millones de toneladas de partículas submicrométricas de polvo en la estratosfera de la zona templada septentrional. Se trata de una inyección muchas veces mayor que todo el polvo submicrométrico elevado hasta la estratosfera por la erupción del volcán El Chichón (México), en 1982, y es comparable a las inyecciones globales de polvo submicrométrico de erupciones volcánicas muy superiores, como la del Tambora, en 1815, y la del Krakatoa, en 1883.

Frecuentemente se establecen, por conveniencia, analogías entre los efectos atmosféricos de las erupciones volcánicas importantes y los de una guerra nuclear. Sin embargo, no hay manera sencilla de comparar los efectos de una erupción volcánica con los de una serie de detonaciones nucleares. Las partículas de aerosol producidas por los volcanes son fundamentalmente diferentes en composición, tamaño y forma de las producidas en explosiones nucleares. Por tanto, hemos basado nuestros cálculos en las propiedades del polvo medidas directamente en nubes debidas a explosiones nucleares.

La única comparación adecuada entre la erupción volcánica y la explosión nuclear es el espesor óptico del aerosol persistente que se produce. De hecho, hemos utilizado datos sobre "velos de polvo" globales generados por erupciones volcánicas para someter a prueba y calibrar nuestros modelos climáticos. El hacerlo así nos ha permitido explicar cuantitativamente el efecto de enfriamiento superficial hemisférico observado tras las principales erupciones volcánicas. Los presentes cálculos referentes al polvo nuclear concuerdan enteramente con las observaciones de fenómenos volcánicos. Por ejemplo, está ahora claro que las erupciones volcánicas violentas generan un apreciable enfriamiento climático durante un año o más. Aún así, en la historia escrita, los volcanes han desempeñado un papel climático bastante modesto. Que los volcanes sean fuentes localizadas de polvo limita su influencia geográfica; además, inyectan comparativamente poco polvo fino (y nada de hollín) en la estratosfera. Las explosiones nucleares, por el contrario, son un poderoso y eficaz medio de inyectar grandes cantidades de fino hollín y polvo en la atmósfera sobre grandes regiones.

Los átomos producidos en las reacciones de fisión de las explosiones atómicas suelen presentarse en forma de isótopos inestables. La desintegración radiactiva de esos isótopos libera radia-



8. VARIACION DE LA TEMPERATURA CON LA ALTURA sobre los continentes septentrionales durante el primer año subsiguiente al caso básico de guerra nuclear de 5000 megatones. Los contornos dan la variación media de temperatura a intervalos de 10 grados Celsius, basada en el modelo unidimensional convectivo-radiativo de los autores. La zona gris indica porciones de la atmósfera enfriadas por debajo de su temperatura normal; la zona de color, las calentadas por encima de su temperatura normal. El intenso calentamiento de la alta troposfera y baja estratosfera se atribuye a la absorción de radiación solar.

ciones alfa, beta y gamma. En la mayoría de armas nucleares, al menos la mitad de la energía liberada se genera por fisión y el resto por fusión. Se producen alrededor de 300 isótopos radiactivos diferentes. La mayoría se condensa sobre los aerosoles y polvo formados en la bola de fuego o aspirados por ella. En consecuencia, el polvo y la radiactividad generados por una explosión nuclear están íntimamente relacionados.

De interés particular aquí son la sedimentación radiactiva inmediata e intermedia. La primera está asociada a isótopos radiactivos de vida corta que se condensan sobre partículas grandes de tierra, que a su vez caen al suelo al cabo de unas horas de producida la explosión nuclear. La sedimentación intermedia está asociada a isótopos de vida más larga, transportados por partículas menores que arrastra el viento y se eliminan por sedimentación y precipitación en un intervalo de días a meses. La sedimentación inmediata se produce en explosiones en el suelo, mientras la intermedia se da en explosiones en el suelo y en el aire en un dominio de potencia de 10 a 500 kilotones, las cuales depositan su radiactividad en la troposfera media y alta.

El peligro de la sedimentación radiactiva se mide en términos de la dosis total en rad (unidad de exposición a la radiación equivalente a 100 erg de energía ionizante depositados en un gramo de tejido), la variación de la dosis en rad por hora y el tipo de radiación. Los efectos más perniciosos son los producidos por la intensa y penetrante radiación gamma de la deposición inmediata. La sedimentación intermedia, más extendida, da lugar a una dosis de rayos gamma a largo plazo y menos potente. Una exposición de 450 rad a los rayos gamma en todo el cuerpo, recibida a lo largo de varios días, es letal para la mitad de los adultos sanos expuestos. Dosis crónicas de 100 rad o más debidas a sedimentación intermedia podrían inhibir el sistema inmunológico incluso en personas sanas, y causarían incrementos a largo plazo en la incidencia de diversos tipos de cáncer, defectos genéticos y otras enfermedades.

Nuestros estudios más recientes de los efectos de la sedimentación radiactiva indican, en el caso básico, que la sedimentación inmediata podría contaminar millones de kilómetros cuadrados de tierra con radiactividad letal. La sedimentación intermedia cubriría al menos la zona templada septentrional, produciendo, a largo plazo, exposiciones medias de rayos gamma en todo el cuerpo de unos 50 rad en poblaciones no protegidas. Las exposiciones internas de ciertos órganos a isótopos radiactivos biológicamente activos, como el estroncio 90 y el yodo 131, que penetran en la cadena de alimentación, duplicarían o triplicarían esas dosis. Según Joseph B. Knoz, del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, si se atacara directamente las centrales nucleares, la dosis media de rayos gamma a largo plazo aumentaría hasta varios cientos de rad o más.

Los modelos de ordenador que hemos empleado para establecer la magnitud potencial de las secuelas globales a largo plazo de una guerra nuclear son unidimensionales: consideran sólo la estructura vertical de la atmósfera. Pero ésta es un complicado sistema tridimensional cuyas intrincadas interacciones determinan su respuesta a las perturbaciones. En el momento actual, sin embargo, no hay modelos tridimensionales con las características apropiadas para tratar el problema del invierno nuclear con alta precisión, aunque se elaboran ya varios. Los modelos existentes para el clima y la circulación general de la atmósfera incorporan cierto número de tratamientos empíricos para procesos físicos que no se conocen bien. En la hipótesis de un universo nuclear, el clima queda tan seriamente alterado que es dudosa la aplicabilidad de tales tratamientos.

Nuestro enfoque, por tanto, ha sido estimar los efectos de primer orden mediante cálculos microfísicos, químicos y ópticos detallados en un formato unidimensional. Ni tan sólo este enfoque simplificado se había intentado antes de nuestro trabajo, y no estaba claro que un trabajo tridimensional más elaborado estuviera justificado. Basándose en los efectos unidimensionales de primer orden predichos, se dedujeron las principales interacciones meteorológicas tridimensionales que habrían de tratarse en estudios más refinados. Los resultados tridimensionales vienen a confirmar nuestros resultados unidimensionales.

En nuestro estudio se usaron tres modelos básicos: un modelo de guerra nuclear, un modelo de microfísica de partículas y un modelo radiativo-convectivo del clima. El modelo de guerra nuclear determina las cantidades de humo, polvo, radiactividad y pirotoxinas generadas por un ataque atómico específico, basándose (entre otras cosas) en las estimaciones de humo y polvo citadas arriba. El modelo microfísico simula la evolución de la cantidad y el tamaño de las partículas de polvo y humo, así como la sedimentación de radiactividad, teniendo en cuenta las interacciones físicas y el transporte vertical de partículas a todas las altitudes. El modelo radiativo-convectivo calcula las propiedades ópticas e infrarrojas de las partículas en transformación, los flujos de energías en el visible e infrarrojo y las temperaturas del aire en función de las respectivas altitudes y del tiempo. Dado que las temperaturas del

aire predichas dependen de las capacidades caloríficas de la superficie, se hicieron cálculos separados para fenómenos sobre mar y sobre tierra, a fin de tener en cuenta las posibles diferencias de temperatura.

Los modelos unidimensionales no pueden predecir con precisión los efectos locales o a corto plazo de una guerra nuclear. La aplicabilidad de las predicciones basadas en tales modelos depende de la velocidad y extensión de la dispersión de los penachos de humo y de las nubes de polvo. Poco después de un ataque atómico, miles de penachos y nubes de polvo se distribuirían en toda la zona templada septentrional, a alturas de hasta 20 kilómetros. La acción de la difusión turbulenta horizontal, la cizalladura vertical del viento y continuadas emisiones de humo repartirían casi con certeza las nubes de detritos nucleares sobre la totalidad de la zona y llenarían los huecos en el plazo de una semana. Los efectos locales en ese período podrían discrepar considerablemente respecto al promedio simulado con nuestros modelos unidimensionales.

Las grandes incertidumbres inherentes en cualquier valoración de los efectos de una guerra nuclear aconsejaron el desarrollo de una gama de simulaciones para investigar la sensibilidad de los diversos resultados a variaciones en la hipótesis y en las variables físicas clave. Aunque no todos esos resultados se pueden discutir en un artículo de la presente extensión, se hallan reunidos algunos descubrimientos seleccionados en las ilustraciones que le acompañan.

En general, nuestros resultados sugieren que el espesor óptico de la nube de humo y polvo resultante de un ataque nuclear masivo sería, como mínimo, comparable o mayor que el resultante de una erupción volcánica importante, y que el espesor óptico más probable sería un orden de magnitud mayor. El resultado más probable de una guerra nuclear sería, por tanto, una catástrofe climática.

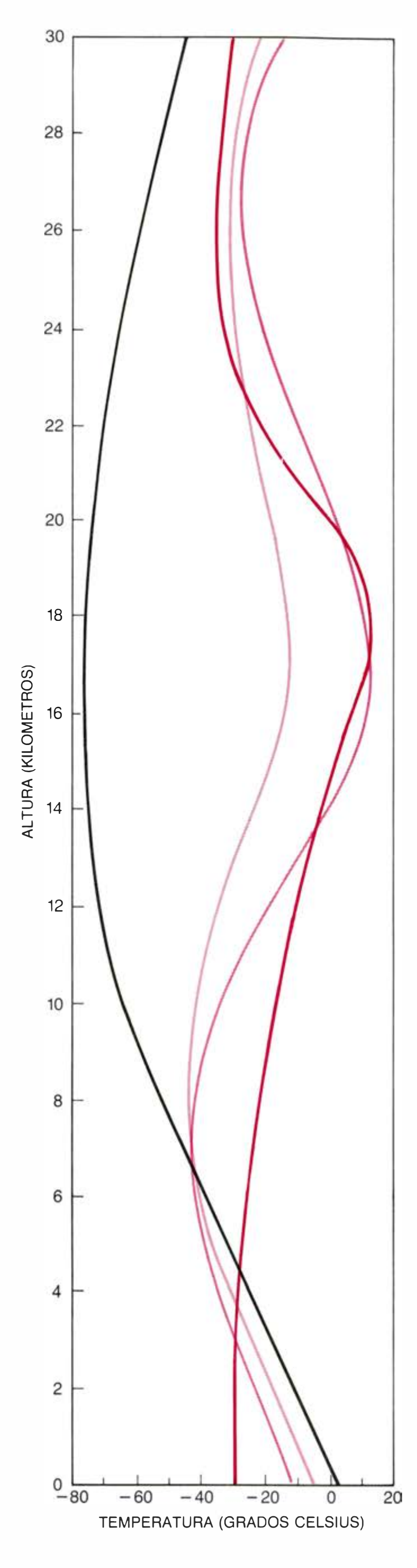
El efecto final del humo y del polvo sobre el clima depende de la fracción de radiación solar que no alcanza la superficie. Puede llegar a darse, por tanto, un efecto de saturación. Por ejemplo, una nube de humo con un espesor óptico de tres puede impedir que el 95 por ciento o más de la radiación solar alcance el suelo. Espesores ópticos mayores pueden producir solamente pequeños decrecimientos adicionales en la radiación solar en superficie. Así, un espesor óptico aproximado de tres viene a ser el nivel de saturación para efectos climáticos inducidos por el humo. El nivel de saturación para el polvo se da a espesores ópticos en torno a 20; su introducción es mucho más gradual, con espesor óptico creciente, que el nivel de saturación para el humo. No se sabe si una guerra nuclear podría levantar suficiente polvo para crear saturación óptica a escala global.

El mecanismo por el que una nube de humo atenúa la luz difiere también de cómo lo hace una de polvo. Un velo de humo ahollinado absorbe la mayor parte de la luz incidente y difunde sólo una pequeña fracción, devolviéndola al espacio o dirigiéndola hacia la superficie. La absorción calienta rápidamente las nubes de humo, induciendo poderosos movimientos de aire y vientos. Las nubes de polvo, por otra parte, difunden principalmente la radiación solar incidente y absorben sólo una pequeña fracción. Para cerrarle el paso a la radiación, las nubes difusoras han de ser muy espesas, porque gran parte de la radiación se difunde hacia delante, en dirección a la superficie de la Tierra. (Recuérdese que las nubes ordinarias de agua suelen poseer un espesor óptico de 10 o más.)

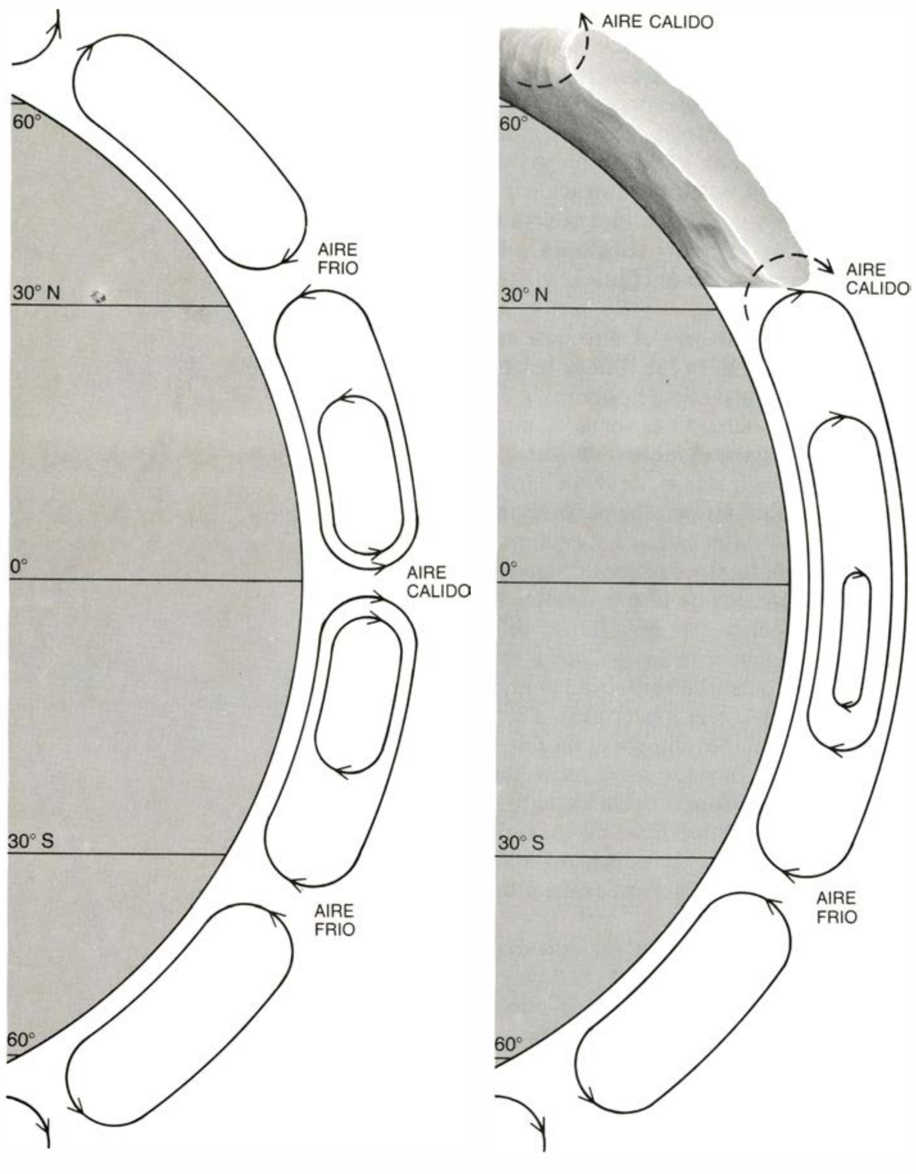
Hemos visto que, en muchos casos, la reducción substancial de la radiación solar tras una guerra nuclear persiste semanas y meses. En la primera o segunda, las nubes no cubrirían el cielo; de ahí que nuestros cálculos probablemente subestimen la irradiancia media en esas primeras fases. Sin embargo, en las zonas atacadas estaría demasiado oscuro para verse, incluso a mediodía.

La gran cantidad de humo generado por un ataque nuclear podría conducir a notables descensos de las temperaturas continentales durante un apreciable período. En muchos de los casos representados en las ilustraciones que acompañan a este artículo, las temperaturas en tierra permanecen bajo cero durante meses. Descensos de temperatura media de sólo unos grados en primavera o a principios de verano podrían destruir las cosechas en toda la zona templada septentrional. En el caso base, se predicen descensos de temperatura de unos 40 grados Celsius (hasta una media absoluta de −25 grados), y son posibles enfriamientos todavía mayores con los actuales arsenales nucleares y los previstos para un futuro próximo.

Los cambios de temperatura del aire predichos en función de la altitud y del tiempo, para nuestro caso base de 5000 megatones, revelan varias características interesantes. Primero, la atmósfera



9. COMPARACION DE LOS PERFILES de temperatura de la atmósfera antes y después de una guerra nuclear de 5000 megatones. La curva negra es el perfil de temperatura normal. Las otras curvas muestran el perfil un mes después de la guerra (*color oscuro*), tres meses después (*color intermedio*) y seis después del conflicto (*color claro*).



10. LAS CARACTERISTICAS DE LA CIRCULACION GLOBAL de la atmósfera podrían verse alteradas por una guerra nuclear a gran escala en el hemisferio Norte. En la primavera y verano de este hemisferio, la circulación global media en dirección meridiana (esto es, Norte-Sur) está dominada por una gran célula convectiva, llamada de Hadley, en la que el aire asciende encima de los húmedos y calientes trópicos, se divide en dos corrientes y desciende sobre las latitudes medias y subtropicales en ambos hemisferios, estableciendo células de circulación secundaria a latitudes más altas (*diagrama de la izquierda*). Si se introdujera una nube de humo y polvo, grande y densa, en la troposfera de la zona templada septentrional durante esas estaciones, el efecto de calentamiento troposférico, en el borde meridional de la nube, podría ser suficientemente intenso para invertir la corriente descendente normal de latitudes medias; convertiría entonces la circulación de Hadley en una circulación insólita, caracterizada por una única célula dominante con los vientos en altura soplando activamente a través del ecuador de Norte a Sur (*diagrama de la derecha*). Esta nueva configuración de la circulación se ha observado en modelos de ordenador de la circulación general atmosférica elaborados por investigadores americanos y soviéticos.

superior se calienta entre 30 y 80 grados Celsius cuando la radiación solar, que normalmente calienta el suelo, es absorbida por las capas más altas de humo. Al mismo tiempo, el suelo se enfría en la oscuridad. Las nubes calientes, como globos de aire caldeado, no permanecerían estacionarias, sino que se elevarían y expandirían.

Un mes después de un ataque nuclear generalizado, la troposfera que cubre los continentes alcanzaría el equilibrio térmico. Incluso tres meses después, sólo los contados kilómetros más bajos recibirían energía solar suficiente para impulsar una débil convección. La estratosfera descendería hasta la superficie, creando una atmósfera extraña. En algunos lugares, las corrientes cálidas de aire oceánico todavía se moverían sobre los continentes a ras del suelo, pero esa fuente de calor impulsaría la convección en el ámbito de los kilómetros inmediatos a la superficie. La intensa inversión de temperaturas amortiguaría eficazmente la actividad convectiva de gran alcance. En los demás lugares, el aire frío continental que se moviera sobre los océanos podría calentarse, ascender y volver a circular sobre los continentes para acabar por descender sobre el suelo.

Una posible consecuencia de la inversión de temperaturas causada por tal nube de humo sería un aumento en el tiempo de residencia del humo y el polvo en la atmósfera. Este resultado representa un efecto de realimentación positiva que no se ha tenido en cuenta hasta ahora en los cálculos y que agravaría la severidad del invierno nuclear y prolongaría su duración. La inversión de temperaturas reduce la penetración convectiva del aire húmedo desde abajo, inhibiendo la condensación de agua en el aire ahumado y limitando con ello en gran medida la precipitación a alturas superiores a algunos kilómetros. Cuanto más tiempo permanezcan el hollín y el polvo en la atmósfera, tanto más se esparcirán horizontalmente y tanto más se extenderá su efecto climático. Bajo esas condiciones, las partículas se eliminan principalmente por aglomeración continuada y deposición por transporte por los sistemas de vientos a escala global y por turbulencia hasta bajas alturas, donde aún se produce un lavado por precipitación.

Nuestras variaciones de temperatura calculadas sobre masas de tierra extensas no toman en cuenta el hecho de que inicialmente la cobertura nubosa sería parcial, ni tampoco la dilución subsiguiente de aire frío continental en aire marítimo caliente. Michael C. MacCracken, de Livermore, ha investigado los efectos combinados de la cobertura nubosa parcial y el intercambio de calor desde el océano, trabajando con un modelo de circulación general para seguir la pista de grandes masas de humo; ha trabajado también con un modelo climático bidimensional para calcular las temperaturas del suelo correspondientes a la emisión de humo en nuestro caso básico de 5000 megatones. Ha encontrado descensos de la temperatura media sobre el suelo que son aproximadamente la mitad de nuestros descensos de temperatura en el interior de los continentes. Ciertos cálculos todavía más complicados, con modelos tridimensionales de circulación general para condiciones semejantes a nuestras hipótesis del caso base confirman que pueden registrarse descensos de temperatura de entre 20 y 40 grados sobre vastas superficies continentales.

Los resultados de nuestros cálculos indican que los movimientos inducidos

en las nubes de hollín por absorción de radiación solar podrían hacer que dichas nubes se elevasen y se extendieran horizontalmente. El fenómeno podría acelerar tanto la dispersión de los penachos de humo en la fase inicial como su extensión global, proceso que, por lo demás, está dominado por la cizalladura del viento y las turbulencias. Recientemente, un grupo del Centro de Investigación Ames de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), compuesto por Robert M. Haberle y dos de los autores (Ackerman y Toon), empleó un moderno modelo bidimensional de la circulación general para calcular el movimiento de nubes de hollín calentadas en la troposfera terrestre. El grupo de Ames consideró una nube de hollín uniforme situada entre 30 y 60 grados de latitud Norte; rodeaba la Tierra a esas latitudes y se extendía desde el suelo hasta una altura de ocho kilómetros. Esta simulación muestra grandes fragmentos de nube elevándose hasta la estratosfera y moviéndose rápidamente hacia el ecuador y el hemisferio Sur.

Aunque se trata de cálculos preliminares, respaldan una de las hipótesis más importantes de nuestro estudio inicial: que las nubes autopropulsadas de humo y polvo del hemisferio Norte podrían transportarse rápidamente al hemisferio Sur, en el que también causarían grandes anomalías climáticas. Tal dispersión acelerada podría dejar sentir sus efectos más drásticos en los trópicos de ambos hemisferios, donde los organismos autóctonos son extremadamente sensibles a la oscuridad y el frío. Un invierno nuclear que se extendiese hasta los trópicos representaría un desastre ecológico sin precedentes en la historia.

Nuestras especulaciones acerca de grandes perturbaciones meteorológicas y transporte interhemisférico tras un conflicto nuclear se han visto también respaldadas por complicados cálculos realizados con modelos tridimensionales de la circulación general. Estos modelos no están todavía diseñados para seguir el movimiento de polvo y humo como elementos trazadores o para efectuar los necesarios cálculos detallados de transprte radiativo de calor. Pese a ello, permiten establecer las perturbaciones tridimensionales iniciales en el viento y la temperatura causadas por inyecciones de humo de gran cuantía. Dos grupos de investigadores han realizado tales estudios climáticos avanzados: Curt Covey, Stephen H. Schneider y Starley L. Thompson, del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) en Boulder (Colorado), y Vladimir V. Alexandrov y Georgi L. Stenchikov, del Centro de Cálculo de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética.

Las predicciones obtenidas por ambos grupos acerca de la circulación meridiana (Norte-Sur), normal y perturbada, de la atmósfera, varias semanas después de una ataque nuclear en el hemisferio Norte, en primavera o verano, conducen a la misma conclusión: la célula de Hadley, circulación que se bifurca en los trópicos, se transformaría en una única e intensa célula con fuertes vientos en la alta troposfera, soplando directamente del hemisferio Norte al hemisferio Sur. Ello constituiría un profundo cambio del sistema global de vientos.

Por circulación meridiana media se entiende el movimiento residual de ondas de oscilación planetaria a gran escala. Los modelos de circulación global predicen anomalías en los movimientos en forma de ondas planetarias; también aquí, los resultados son sorprendentes. El grupo del NCAR ha encontrado que masas de aire de tamaño continental calentadas podrían penetrar profundamente en el hemisferio Sur en cuestión de días. En esencia, todas las masas de tierra habitable del planeta podrían quedar sometidas al oscurecimiento por hollín. Los modelos de circulación global pronostican también temperaturas por debajo de cero sobre la mayor parte de las regiones continentales septentrionales. Lo llamativo es que la congelación local podría producirse en un plazo de dos o tres días; el grupo del NCAR se refiere a ello como "congelación rápida". Bajo tales circunstancias, ninguna región del globo, septentrional o meridional, quedaría libre del invierno nuclear.

Considerar la posible actividad meteorológica en la proximidad de las costas durante el invierno nuclear sugiere que, aun cuando la radiación solar incidente se redujera de forma importante, los océanos continuarían alimentando de calor y humedad la capa fronteriza de la atmósfera en la vecindad de las costas. En algunas regiones, los vientos fríos que soplan sobre la costa desde el continente interaccionarían con el entorno marítimo para producir intensas tormentas y grandes precipitaciones. En otras regiones, donde los vientos dominantes arrastran aire oceánico sobre los continentes, podría producirse espesas nubes estratiformes y precipitación continua. No se sabe hasta qué punto ese mal tiempo podría extender-

se hacia el interior del continente desde las costas; probablemente, el grueso de la actividad se desarrollaría en un radio de 100 kilómetros.

Se han planteado otras muchas preguntas acerca del invierno nuclear; por ahora permanecen sin respuesta. Con el rápido enfriamiento superficial, se formarían extensas nieblas que podrían afectar el balance de radiación de la superficie. La presencia de millones de toneladas de residuos nucleares en la atmósfera podría modificar las propiedades de las gotículas de agua de las nubes y, por tanto, la velocidad de eliminación de los residuos. Las nubes nucleares y las nubes naturales modificadas alterarían también el balance global de radiación de la atmósfera, pero las consecuencias sobre las temperaturas en superficie siguen siendo inciertas. Las variaciones diurnas, que todavía no se han tratado en los modelos climáticos aplicados al problema de la guerra atómica, podrían también influir en la dinámica y la eliminación de los residuos nucleares. El agua inyectada por explosiones e incendios podría afectar los procesos químicos y radiativos de la atmósfera. Todos esos efectos son importantes refinamientos de segundo orden de la teoría climática básica del invierno nuclear. Mas, con los datos existentes, ninguno de esos efectos parece ser capaz de alterar apreciablemente las principales influencias climáticas que ahora se pronostican para una guerra nuclear.

Tampoco se conoce bien la interacción entre la atmósfera y los océanos, de innegable influencia en los cambios climáticos a corto plazo. Por medio de lo que tal vez constituyó una serie de coincidencias, la erupción de El Chichón, en la primavera de 1982, fue seguida por un infrecuentemente intenso calentamiento de tipo El Niño en el Pacífico Sur, en el invierno de 1982 y primavera de 1983, asociado con una inesperada calma de los alisios meridionales. A esos sucesos siguió un tiempo poco corriente en Europa y Norteamérica en el invierno de 1982 y todo 1983. La mayor parte de Norteamérica sufrió un invierno gélido, como no se recordaba ya, mientras que Europa disfrutó de una templada primavera en diciembre. Aunque no existe prueba alguna de que esos sucesos estuviesen relacionados, las indicaciones sugieren un acoplamiento potencialmente significativo de corrientes oceánicas, vientos y tiempo en un período de tiempo bastante corto; tal relación todavía no se ha establecido rigurosamente.

Nuestro estudio consideró también cierto número de efectos climáticos secundarios de una guerra nuclear. Los incendios generalizados, la deposición de hollín sobre la nieve o el hielo y la modificación regional de la vegetación causan variaciones en el albedo o reflectividad de la superficie terrestre. Se evaluaron los cambios del albedo a corto plazo y se encontró que eran insignificantes comparados con la atenuación de la luz solar. Si se produjesen variaciones del albedo semipermanentes importantes, podrían seguirse variaciones en el clima a largo plazo. Por otra parte, la vasta fuente de calor oceánica actuaría después de toda perturbación importante, tratando de elevar al clima a los valores contemporáneos. Y así hemos llegado a la conclusión provisional de que no es probable que una guerra nuclear desencadenase un período glaciar.

También hemos analizado los efectos climáticos causados por cambios en la composición gaseosa de la atmósfera. La máxima perturbación de la temperatura hemisférica asociada a la producción de óxidos de nitrógeno y a la consiguiente reducción de la concentración de ozono es un enfriamiento de algunos grados Celsius. La concentración de los gases responsables del efecto de invernadero también quedaría modificada por una guerra nuclear; tales gases producirían un calentamiento en superficie de varios grados después de que el polvo y el humo desaparecieran. Estas perturbaciones compensadoras de temperatura son, sin embargo, inciertas, pues las variaciones químicas y físicas de la composición de la atmósfera producidas por una guerra nuclear estarían relacionadas mediante procesos no representados adecuadamente en los actuales modelos. Se tiene la firme intención de seguir estudiando este punto.

Las consecuencias reales de una guerra nuclear nunca se pueden predecir con precisión. Las interacciones sinérgicas entre los distintos procesos implicados podrían complicar el problema de la supervivencia para muchos organismos. La destrucción del entorno a largo plazo y la desorganización del ecosistema global podrían resultar todavía más devastadores para la especie humana que los temibles efectos a corto plazo de destrucción por las explosiones nucleares y su deposición radiactiva. A la vista de estas conclusiones, deben reconsiderarse las políticas estratégicas de ambas superpotencias y sus respectivas alianzas militares.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

EFECTOS CLIMATICOS DE UNA GUERRA NUCLEAR

NUCLEAR WINTER: GLOBAL CONSEQUENCES OF MULTIPLE NUCLEAR EXPLOSIONS. R. P. Turco, O. B. Toon, T. P. Ackerman, J. B. Pollack y Carl Sagan en *Science*, vol. 222, n.º 4630, págs. 1283-1292; 23 de diciembre de 1983.

NUCLEAR WAR AND CLIMATIC CATASTROPHE: SOME POLICY IMPLICATIONS. Carl Sagan en *Foreign Affairs*, volumen 62, n.º 2, págs. 257-292; invierno, 1983/1984.

GLOBAL ATMOSPHERIC EFFECTS OF MASSIVE SMOKE INJECTIONS FROM A NUCLEAR WAR: RESULTS FROM GENERAL CIRCULATION MODEL SIMULATIONS. Curt Covey, Stephen H. Schneider y Starley L. Thompson en *Nature*, vol. 308, n.º 5954, págs. 21-25; 1 de marzo de 1984.

BANDEO DE CROMOSOMAS

THE MECHANISM OF C- AND G- BANDING OF CHROMOSOMES. D. E. Comings, E. Avelino, T. A. Okada y H. E. Wyandt en *Experimental Cell Research*, vol. 77, págs. 469-493; 1973.

LONGITUDINAL DIFFERENTIATION OF CHROMOSOMES. T. C. Hsu en *Annual Review of Genetics*, vol. 7, págs. 153-176; 1974.

MOLECULAR STRUCTURE OF HUMAN CHROMOSOMES. J. J. Yunis. Academic Press, 1977.

THE EUKARYOTIC CHROMOSOME. C. J. Bostock y A. T. Sumner. North Holland Publishing Company, 1978.

OBJETO SUPERLUMINOSO EN LA GRAN NUBE DE MAGALLANES

CENTRAL OBJECT OF THE 30 DORADUS NEBULA, A SUPERMASSIVE STAR. Joseph P. Cassinelli, John S. Mathis y Blair D. Savage en *Science*, vol. 212, n.º 4502, págs. 1497-1501; 26 de junio de 1981.

THE NATURE OF R136A, THE SUPERLUMINOUS CENTRAL OBJECT OF THE 30 DORADUS NEBULA. Blair D. Savage, Edward L. Fitzpatrick, Joseph P. Cassinelli y Dennis C. Ebbets en *The Astrophysical Journal*, vol. 273, n.º 2, parte 1.ª, págs. 597-623; 15 de octubre de 1983.

THE MOST LUMINOUS STARS. Roberta M. Humphreys y Kris Davidson en *Science*, vol. 223, n.º 4633, págs. 243-249; 20 de enero de 1984.

PROTEINAS DE ONCOGENES

TRANSFORMING GENE PRODUCT OF ROUS SARCOMA VIRUS PHOSPHORYLATES TYROSINE. Tony Hunter y Bartholomew M. Sefton en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 77, n.º 3, págs. 1311-1315; marzo, 1980.

FUNCTIONS AND ORIGINS OF RETROVIRAL TRANSFORMING GENES. J. Michael Bishop y Harold Varmus en *RNA Tumor Viruses*, dirigido por R. Weiss, N. Teich, H. Varmus y J. Coffin. Cold Spring Harbor Laboratory Monograph Series, 1982.

REGULATION OF CELL GROWTH AND TRANSFORMATION BY TYROSINE-SPECIFIC PROTEIN KINASES: THE SEARCH FOR IMPORTANT CELLULAR SUBSTRATE PROTEINS. Jonathan A. Cooper y Tony Hunter en *Current Topics in Microbiology and Immunology*, vol. 107, págs. 125-161; 1983.

EL TEMPLO MAYOR DE TENOCHTITLAN

THE BASIN OF MEXICO: ECOLOGICAL PROCESSES IN THE EVOLUTION OF CIVILIZATION. William T. Sanders, Jeffrey R. Parsons y Robert S. Santley. Academic Press, 1979.

THE TEMPLO MAYOR OF TENOCHTITLÁN: ECONOMICS AND IDEOLOGY. Eduardo Matos Moctezuma en *Ritual Human Sacrifice in Mesoamerica*, dirigido por Elizabeth H. Boone. Dumbarton Oaks, 1984.

FIBRAS OPTICAS EN VEGETALES

PLANTS AND THE DAYLIGHT SPECTRUM: PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF THE BRITISH PHOTOBIOLOGY SOCIETY, LEICESTER, 5-8 JANUARY, 1981. Dirigido por H. Smith. Academic Press, 1981.

FIBER OPTIC PLANT TISSUES: SPECTRAL DEPENDENCE IN DARK-GROWN AND GREEN TISSUES. D. F. Mandoli y W. R. Briggs en *Photochemistry and Photobiology*, vol. 39, págs. 419-424; 1984.

MANIPULACION MECANICA DE PARTES ALEATORIAMENTE ORIENTADAS

DETERMINING SHAPE AND REFLECTANCE USING MULTIPLE IMAGES. B. K. P. Horn, R. J. Woodham y W. M. Silver. M.I.T. A.I. Laboratory, Memo 490; agosto, 1978.

A ROBOT SYSTEM WHICH ACQUIRES CYLINDRICAL WORKPIECES FROM BINS. Rober B. Kelley, John R. Birk, Henrique A. S. Martins y Richard Tella en *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-12, n.º 2, págs. 204-213; marzo/abril, 1982.

REPRODUCCION COOPERATIVA DEL PICAMADEROS DE LAS BELLOTAS

SOCIAL ORGANIZATION AND BEHAVIOR OF THE ACORN WOODPECKER IN CENTRAL COASTAL CALIFORNIA. Michael H. MacRoberts y Barbara R. MacRoberts. The American Ornithologists' Union, Ornithological Monographs n.º 21; Allen Press, 1976.

AVIAN COMMUNAL BREEDINGS SYSTEMS. Jerram Brown en *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 9, págs. 123-155; 1978.

COOPERATIVE BREEDING STRATEGIES AMONG BIRDS. Stephen Emlen y Sandra Vehrencamp en *Perspectives in Ornithology: Essays Presented for the Centennial of the American Ornithologists' Union*, dirigido por Alan Brush y George A. Clark. Cambridge University Press, 1983.

JUEGOS DE ORDENADOR

COMPUTATION: FINITE AND INFINITE MACHINES. Marvin L. Minsky. Prentice-Hall, Inc., 1967.

MÁQUINAS DE TURING. John E. Hopcroft en *Investigación y Ciencia*, n.º 94, págs. 8-19; julio, 1984.

TALLER Y LABORATORIO

LEANING TOWER OF LIRE. Paul B. Johnson en *American Journal of Physics*, vol. 23, n.º 4, pág. 240; abril, 1955.

DOMINO "CHAIN REACTION". Lorne A. Whitehead en *American Journal of Physics*, vol. 51, n.º 2, pág. 182; febrero, 1983.